

Un modello stocastico per la valutazione dell'affidabilità
di strutture difettate al procedere dell'esercizio

S. Reale, L. Tognarelli

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali - Università di Firenze
Via di S. Marta, 3 - 50139 FIRENZE

SOMMARIO

Viene presentato un modello affidabilistico che, utilizzando concetti e metodi di Meccanica della Frattura, consente di analizzare in modo integrato gli stati limite prodotti dalla fatica e dal cedimento statico. Identificato un componente, definite le condizioni di esercizio e ipotizzata una possibile distribuzione statistica delle difettosità, l'applicazione del modello consente di determinare l'evoluzione della distribuzione dei difetti, di calcolare la probabilità di collasso statico relativa a ciascun istante dell'esercizio e di valutare la variazione dell'affidabilità strutturale al procedere della vita operativa.

L'elemento critico per l'applicazione del modello e, più in generale, per le valutazioni di affidabilità di componenti difettati, risulta essere la determinazione dello stato di difettosità del materiale. Nel presente lavoro viene presentato un esempio di come l'esperienza accumulata attraverso i RRT (come il PISC) possa essere impiegata per arricchire e correggere i risultati forniti dalle ispezioni.

1. Introduzione

Per i componenti rilevanti per quanto riguarda la sicurezza, soprattutto se inseriti in impianti ad alto rischio o ad alto contenuto tecnologico non si può prescindere dall'analisi del loro comportamento strutturale e della loro rispondenza ai requisiti di affidabilità (*Fitness for Purpose*) in presenza di difetti.

Le valutazioni di affidabilità comportano la conoscenza delle condizioni operative, del materiale e della sua qualità interna (tipo, posizione e dimensione dei difetti).

Il cedimento statico di un componente, nel quale sia presente o sia ipotizzabile la presenza di difettosità, e il processo di propagazione dei difetti (per fatica o per effetto di altri meccanismi di accrescimento) sono processi stocastici sia per effetto della variabilità intrinseca dei fenomeni sia per effetto dell'aleatorietà delle variabili che sono coinvolte.

I modelli di affidabilità strutturale costituiscono uno degli elementi del processo decisionale associato alla messa in esercizio o al mantenimento in servizio di strutture (Figura 1).

Al momento, la determinazione dello stato di difettosità dei componenti, affidato a tecniche di controllo non distruttivo, costituisce l'elemento critico del processo di ottenimento dei prefissati livelli di sicurezza e di affidabilità strutturale. Infatti i dati relativi ai difetti presenti nei componenti ispezionati forniti dai controlli non distruttivi sono generalmente affetti da margini

di incertezza più ampi rispetto alle altre informazioni richieste per le valutazioni di affidabilità (caratteristiche meccaniche del materiale e stati di tensione associati alle diverse condizioni di esercizio).

Fitness for Purpose di elementi difettati

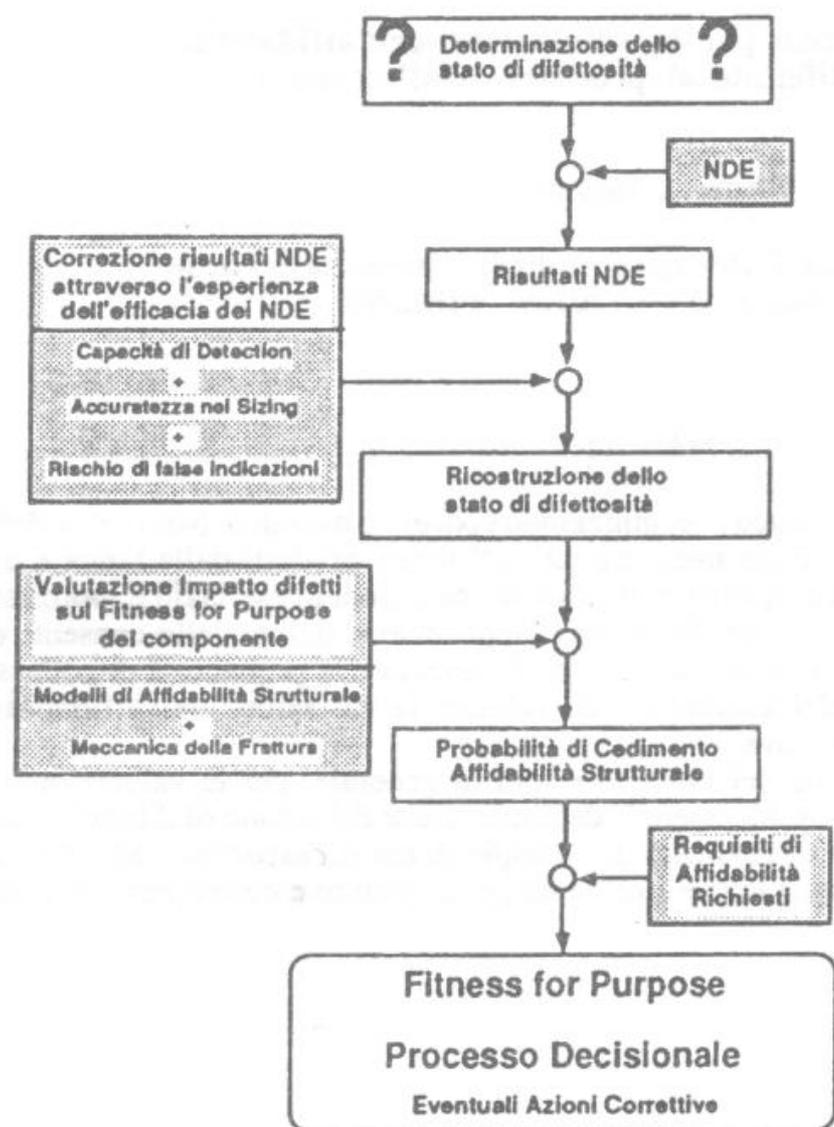


Fig. 1 Schema del processo decisionale associato al Fitness for Purpose di elementi difettati

Un ulteriore fonte di incertezza è legata alla possibilità di mancate individuazioni di eventuali difetti presenti. Se i risultati di un'ispezione non riportano alcun difetto di una certa dimensione in una certa posizione, non è da escludere che esistano difetti di quel tipo.

Ciascuna incertezza sopra elencata dipende sia dal tipo e dalle caratteristiche delle procedure di controllo, sia dal tipo e dalle caratteristiche (dimensioni e posizioni) dei difetti.

Ai fini di migliorare la qualità delle informazioni che vengono utilizzate nel processo decisionale, risulta opportuno aumentare il contenuto informativo dei dati forniti dai controlli.

L'esecuzione di programmi sperimentali (Round Robin Test) come il progetto PISC (Project for the Inspection of Steel Components) hanno consentito di acquisire informazioni ed esperienza sull'efficacia dei controlli non distruttivi e sull'attendibilità delle indicazioni da essi fornite [1-4]. La banca di esperienza accumulata attraverso il PISC può essere utilizzata, eseguendone elaborazioni mirate, per quantificare ciascuna delle fonti di incertezza relative ai

Il processo di valutazione del *Fitness for Purpose* dei componenti strutturali richiede l'esecuzione di ispezioni tramite tecniche di controllo non distruttivo i cui risultati forniscono un certo numero di indicazioni relative alla presenza di difetti e alle loro caratteristiche (tipologia, dimensioni e posizioni). Tali indicazioni non corrispondono all'effettiva popolazione dei difetti ma ne rappresentano la valutazione filtrata attraverso le capacità e le limitazioni delle procedure di controllo utilizzate.

Infatti occorre innanzitutto osservare che non necessariamente ciascuna indicazione ottenuta attraverso i controlli corrisponde effettivamente alla presenza di un difetto, ma esiste un certo margine di rischio che si tratti di una falsa indicazione.

Le dimensioni e la posizione dei difetti determinate attraverso i controlli non distruttivi sono affette da errori sistematici e da incertezze dovute alla dispersione propria delle misure. Le dimensioni determinate attraverso i controlli rappresentano soltanto delle stime delle dimensioni dei difetti effettivamente presenti.

risultati delle ispezioni. Tale base di conoscenza può e deve essere utilizzata per correggere le indicazioni fornite dalle ispezioni ed ottenere quindi una stima più attendibile della distribuzione statistica dei difetti (di forma, posizione, dimensioni diverse) da potere utilizzare nei modelli di affidabilità.

2. Un modello stocastico per la valutazione dell'affidabilità di strutture difettate al procedere dell'esercizio

Viene presentato un modello affidabilistico che, utilizzando concetti e metodi di Meccanica della Frattura, consente di analizzare in modo integrato gli stati limite prodotti dalla fatica e dal cedimento per effetto dei carichi statici.

L'evoluzione per fatica di un difetto che si produce durante un certo periodo di esercizio può essere considerata un processo markoviano [5-7].

Mutuando la stessa filosofia di base, anche il processo di cedimento statico può essere schematizzato attraverso una catena markoviana.

Per valutare i parametri che caratterizzano l'avanzamento dei difetti per fatica (numero di stadi dell'evoluzione e probabilità di transizione da uno stadio all'altro) viene utilizzata la legge di Paris in quanto questa rappresenta la procedura di più diffusa applicazione ed è riportata anche in diverse normative. È possibile fare riferimento per la legge evolutiva dei difetti anche ad altre formule che richiedono però in genere la conoscenza di un maggior numero di parametri non sempre disponibili.

Fissata la distribuzione iniziale dei difetti, è possibile valutare l'evoluzione di ciascuno dei difetti appartenenti alla distribuzione per effetto dell'esercizio, determinando per ogni istante la distribuzione statistica dei difetti.

L'affidabilità strutturale del componente viene valutata, nota la distribuzione statistica dei difetti, considerando la probabilità di cedimento del componente per effetto dell'applicazione dei carichi statici. Il cedimento statico è analizzato utilizzando la procedura CEGB R6 Rev. 3 [8] (sostanzialmente recepita in BSI PD 6493: 1991 [9]). La procedura CEGB R6 / BSI PD 6493 consente di valutare le condizioni delle strutture difettate sia nei confronti delle condizioni di collasso plastico sia nei confronti delle condizioni di frattura fragile. Il contributo alla probabilità di cedimento statico relativo a ciascun difetto è calcolata, utilizzando la procedura CEGB R6 / BSI PD 6493 congiuntamente al Metodo Monte Carlo, come probabilità di violazione dello stato limite definito dalla frontiera della Failure Assessment Line.

La peculiarità dell'approccio consiste nell'integrazione tra l'evoluzione dei difetti per fatica e il cedimento statico sia per frattura fragile sia per cedimento plastico (valutato attraverso la procedura CEGB R6 / BSI PD 6493) che può essere innescato per effetto dell'accrescimento dei difetti prodotto dalla fatica.

Identificato un componente, definite le condizioni di esercizio e ipotizzata una possibile distribuzione statistica delle difettosità, l'applicazione del modello consente di:

- determinare l'evoluzione della distribuzione statistica dei difetti;
- valutare la probabilità di collasso relativa a ciascun istante dell'esercizio;
- valutare l'evoluzione dell'affidabilità strutturale al procedere della vita operativa.

2.1. Valutazione della probabilità di collasso per effetto dei carichi statici

Analizzando le possibili condizioni operative e di funzionamento del componente è possibile definire gli stati di sollecitazione e le loro frequenze di accadimento tenendo conto anche delle possibili aleatorietà coinvolte. È inoltre possibile ipotizzare opportune distribuzioni statistiche per le caratteristiche del materiale.

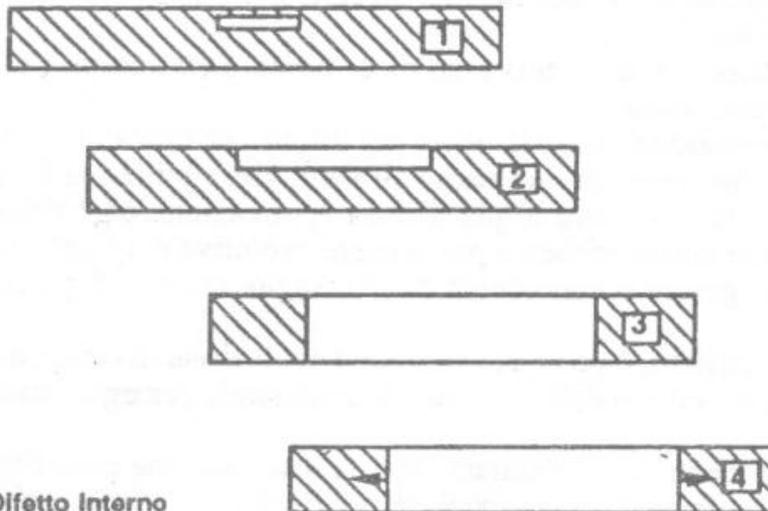
Ciascun potenziale difetto e ciascuna delle possibili condizioni operative contribuiscono in misura diversa alla probabilità di cedimento della struttura. La probabilità globale di cedimento

di una struttura può essere valutata come:

$$P_{fGlobale} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^b p(j) p_i P_{fij} \quad (1)$$

in cui p_i rappresenta la probabilità di esistenza del difetto i , $p(j)$ la probabilità di occorrenza dello stato di tensione j e P_{fij} è la probabilità di cedimento relativa al difetto i e all'evento j .

Il cedimento per effetto dei carichi statici di una struttura difettata, con riferimento al caso di un difetto interno, può essere schematizzato attraverso la successione dei seguenti eventi (Figura 2):



1. Difetto Interno
2. Difetto Superficiale
3. Difetto Passante
4. Instabilità del Difetto Passante

- collasso del ligament del difetto: il difetto diviene affiorante (passaggio dallo stato 1 allo stato 2);
- collasso della sezione difettata: il difetto diviene passante (passaggio dallo stato 2 allo stato 3);
- collasso dell'elemento strutturale per effetto della propagazione instabile del difetto passante (passaggio dallo stato 3 allo stato 4).

Per i difetti superficiali e i difetti passanti occorre considerare rispettivamente solo gli ultimi due stadi e l'ultimo stadio.

Ciascuno degli eventi in cui è stato schematizzato il processo di collasso dipende, in modo probabilistico, solo

Fig. 2 Schematizzazione del processo di collasso statico

dall'evento precedente e quindi il processo può essere considerato markoviano. La sequenza degli eventi sopra descritta definisce gli stadi della catena markoviana e la matrice stocastica di transizione $[P]$ che definisce il processo è esprimibile:

$$[P] = \begin{bmatrix} p_1 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

in cui p_1 è la probabilità che non si verifichi l'evento di collasso del ligament e q_1 la probabilità che il difetto divenga affiorante; p_2 è la probabilità che non si verifichi il collasso della sezione difettata e q_2 la probabilità che il difetto divenga passante; p_3 è la probabilità che il difetto passante sia stabile e q_3 la probabilità che il difetto passante propaghi producendo il collasso definitivo.

Le probabilità p_i e il loro complemento a 1 q_i ($i=1, 2, 3$) di passaggio da uno stadio del processo di cedimento al successivo possono essere valutate applicando la procedura CEGB R6 / BSI PD 6493 congiuntamente al Metodo Monte Carlo. Per ciascuno degli stadi nei quali è

schematizzato il processo di collasso, viene valutata la distribuzione statistica dei Reserve Factor (RF). La probabilità che RF risulti minore dell'unità rappresenta la probabilità che il difetto esaminato sia instabile e tenda a propagarsi per effetto dei carichi applicati passando quindi allo stadio successivo mentre la probabilità che RF risulti maggiore dell'unità rappresenta la probabilità che il difetto esaminato sia stabile e che il processo di collasso si arresti (Figura 3).

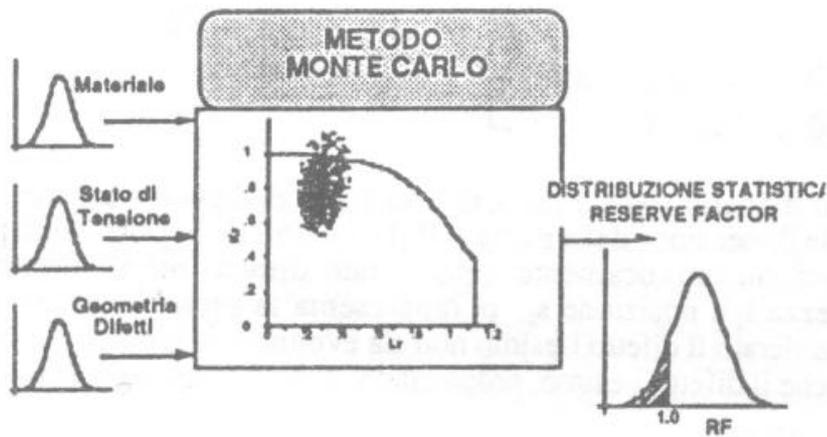


Fig. 3 Valutazione della distribuzione statistica dei Reserve Factor e delle probabilità di transizione da uno stadio del processo di collasso statico al successivo

La schematizzazione del processo di collasso è coerente con lo schema di ricaratterizzazione dei difetti riportato in R6. La Procedura R6 prevede di ricaratterizzare i difetti interni in difetti superficiali e i difetti superficiali in difetti passanti e definisce le dimensioni dei difetti ricaratterizzati tenendo conto della possibile propagazione dei difetti nel senso della lunghezza per effetto del collasso del ligament o dello sfondamento nello spessore.

L'algebra del processo può essere espressa attraverso la:

$$\{p_s\} = \{p_0\} \prod_{k=1}^n [P_k] \quad (3)$$

dove $[P_k]$ è la matrice definita in (2); $\{p_0\}$ e n dipendono dal tipo di difetto inizialmente presente. Risulta:

- $\{p_0\} = \{1, 0, 0, 0\}$ e $n=3$ per i difetti interni;
- $\{p_0\} = \{0, 1, 0, 0\}$ e $n=2$ per i difetti superficiali;
- $\{p_0\} = \{0, 0, 1, 0\}$ e $n=1$ per i difetti passanti.

L'ultimo elemento del vettore $\{p_s\}$ rappresenta la probabilità di cedimento P_{fij} mentre gli altri elementi del vettore rappresentano le probabilità che il processo di collasso si sia arrestato in uno degli stati intermedi.

2.2. Valutazione dell'evoluzione della distribuzione statistica dei difetti per effetto delle sollecitazioni affaticanti

Durante l'esercizio, se le condizioni operative sono tali da prevedere la presenza di carichi affaticanti, ciascuno dei difetti potenzialmente presenti tende a propagarsi.

Il processo evoluzione per fatica di ciascun difetto può essere schematizzato come un processo markoviano. Definita la matrice stocastica di transizione $[P_t]$, la distribuzione statistica delle difettosità iniziali $\{p_0\}$ si trasforma, nel corso dell'evoluzione del processo, secondo la legge:

$$\{p_x\} = \{p_0\} \prod_{t=1}^x [P_t] \quad (4)$$

dove t scandisce il procedere dell'esercizio ed è esprimibile in numero di cicli nel caso di

sollecitazioni affaticanti. $[P_t]$ rappresenta la matrice stocastica di transizione dallo stato $(t-1)$ allo stato t .

La matrice di transizione $[P_t]$ è definita da:

$$[P_t] = \begin{bmatrix} p_1 & q_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & p_{(b-1)} & q_{(b-1)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

I parametri che caratterizzano il modello sono il numero b di passi dell'evoluzione delle dimensioni dei difetti che definisce la dimensione della matrice $[P_t]$ e i valori delle probabilità p_i e q_i . Al passo i -esimo corrispondono univocamente determinate dimensioni di difetto caratterizzate da altezza a_i , lunghezza l_i e posizione s_i . p_i rappresenta la probabilità che al termine del periodo di esercizio considerato il difetto i -esimo non sia evoluto e q_i (complemento a 1 di p_i) rappresenta la probabilità che il difetto i -esimo, propagando, abbia assunto dimensioni a_{i+1} , l_{i+1} e posizione s_{i+1} .

Le probabilità che definiscono la matrice di transizione e il numero di passi dell'evoluzione delle dimensioni dei difetti possono essere valutate utilizzando la legge di Paris (o una qualsiasi altra legge evolutiva) nella quale si introduce l'effetto dell'aleatorietà delle variabili coinvolte (condizioni operative di funzionamento, cioè carichi applicati, caratteristiche meccaniche del materiale ed eventualmente la geometria dei difetti) attraverso il Metodo Monte Carlo. La scelta del numero di passi dell'evoluzione dei difetti e la valutazione delle probabilità p_i e q_i vengono eseguite conformemente a quanto riportato da Bogdanoff [5]. Per minimizzare l'accumulo degli errori dovuti al processo di discretizzazione, l'integrazione stocastica della legge che descrive il processo di accrescimento dei difetti deve essere eseguita per passi definiti delle dimensioni dei difetti e calcolando di conseguenza il numero di cicli [7].

Modificando la matrice di transizione $[P_t]$, l'approccio consente di tenere conto di eventuali modifiche delle condizioni operative di funzionamento e del degrado della caratteristiche meccaniche del materiale oppure di considerare periodi di esercizio di durate diverse.

Definite le modalità con cui costruire la matrice di transizione è possibile determinare l'evoluzione della distribuzione statistica dei difetti presenti all'interno degli elementi strutturali per effetto dell'esercizio.

Nota la popolazione dei difetti presente in un qualsiasi istante della vita del componente è possibile valutare la probabilità di cedimento del componente per effetto dei carichi statici e quindi analizzare le variazioni dell'affidabilità al procedere dell'esercizio.

3. Esempio di applicazione

A titolo di esempio, consideriamo una saldatura in acciaio ferritico di spessore 250 mm, rappresentativa di una saldatura di un componente ad alto rischio quale il vessel di un impianto nucleare, sottoposta ad ispezione con il metodo ultrasonoro.

Il processo decisionale, a valle di un'ispezione, può essere articolato in due stadi. Il primo stadio è volto a valutare se il componente sottoposto ai carichi statici limite di progetto soddisfa i requisiti di affidabilità richiesti. Se tali requisiti vengono soddisfatti, il secondo stadio prevede di valutare l'evoluzione dello stato di difettosità presente al procedere dell'esercizio e di calcolare per ciascun istante la probabilità di collasso per effetto dei carichi statici limite di progetto. Il soddisfacimento dei requisiti di affidabilità consente di stimare la vita residua del componente.

Per le caratteristiche del materiale, per la definizione delle condizioni operative e dei relativi carichi limite di progetto è stato fatto riferimento a ASME [10]; per la tenacità a frattura si sono

utilizzati i valori minimi riportati in letteratura. Le sollecitazioni affaticanti sono state ottenute considerando il ciclo involuppo dei cicli riportati nel rapporto Marshall [11].

Sono state utilizzate distribuzioni tipo Weibull per le caratteristiche meccaniche dei materiali e distribuzioni normali per gli stati di sollecitazione; i coefficienti di variazione sono quelli usualmente riportati in letteratura.

Tutti i dati utilizzati sono riportati in appendice.

Relativamente alle probabilità di accadimento delle diverse condizioni operative, la probabilità di eventi di livello A+B (Normale+Perturbati) è dell'ordine $1 - 10^{-2}$, $10^{-2} - 10^{-4}$ per eventi C (Emergenza) e $10^{-4} - 10^{-6}$ per eventi D (Incidente Grave) [12]. E' stato assunto probabilità 10^{-3} per eventi C e 10^{-5} per eventi D; la probabilità di occorrenza di eventi A+B risulta il complemento a 1 della somma delle probabilità di occorrenza scelte per gli eventi tipo C e D.

L'ispezione ha riportato una indicazione di difetto avente dimensione 38 mm nella direzione dello spessore, lunghezza 30 mm e posizionato a 23 mm dalla superficie. Tale indicazione di difetto corrisponde ad un risultato effettivamente ottenuto nel PISC II nell'ispezione di una saldatura simile a quella considerata da un team che utilizzava il metodo ultrasonoro, la procedura ASME con sensibilità 20% DAC (curva di correzione dell'ampiezza dei segnali in funzione della profondità nello spessore), scansione manuale e la tecnica tandem [13].

A partire da una o più indicazioni di difetti fornite dai risultati delle ispezioni, è possibile, utilizzando l'esperienza PISC, determinare la distribuzione statistica dei difetti potenzialmente presenti nel componente ispezionato, tenendo conto dell'efficacia dell'ispezione relativamente alle sue capacità di individuazione e di dimensionamento e alla probabilità di produrre false indicazioni.

Nelle Figure 4 e 5, sono riportati rispettivamente i dati relativi alle capacità di individuazione e di dimensionamento dei difetti al variare della loro dimensione nella direzione dello spessore. I dati, tratti dal PISC II [13], si riferiscono all'ispezione di una saldatura simile a quella considerata e sono stati ottenuti utilizzando il metodo ultrasonoro e la procedura ASME con sensibilità pari al 20% DAC.

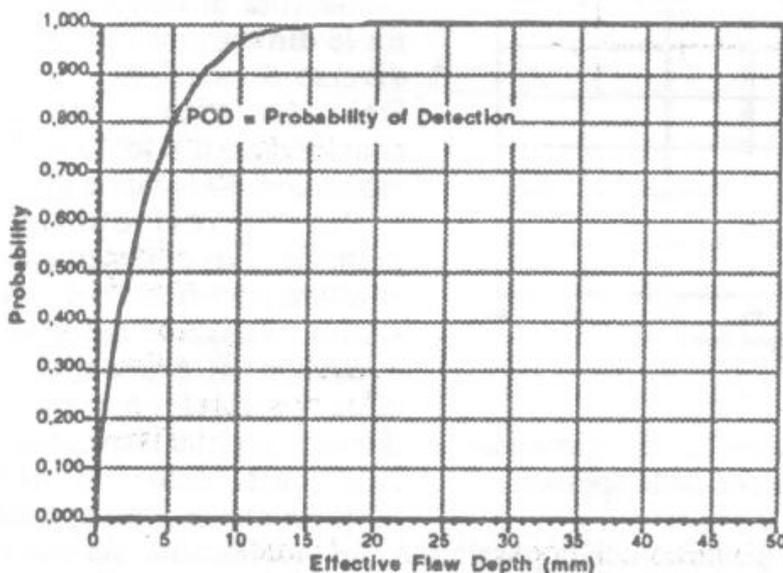


Fig. 4 Rappresentazione delle capacità di individuazione delle procedure ASME con sensibilità 20% DAC ricavata dall'esperienza PISC

figura rappresenta il luogo delle corrette misure della dimensione del difetto presente. Rappresentazioni analoghe possono essere ottenute per le altre dimensioni caratterizzanti i difetti.

La Figura 4 riporta la probabilità di individuazione dei difetti potenzialmente presenti (curva POD, Probability of Detection) in funzione della loro dimensione nella direzione dello spessore. Il complemento a 1 della POD rappresenta il rischio che in certe posizioni del componente esistano dei difetti non individuati con il controllo. Curve analoghe possono essere ottenute per tutte le dimensioni (a, l, s) caratterizzanti il difetto.

La Figura 5 si riferisce alla dimensione dei difetti nella direzione dello spessore e riporta i risultati ottenuti su diversi difetti da diversi operatori impiegando la stessa procedura. La retta riportata in

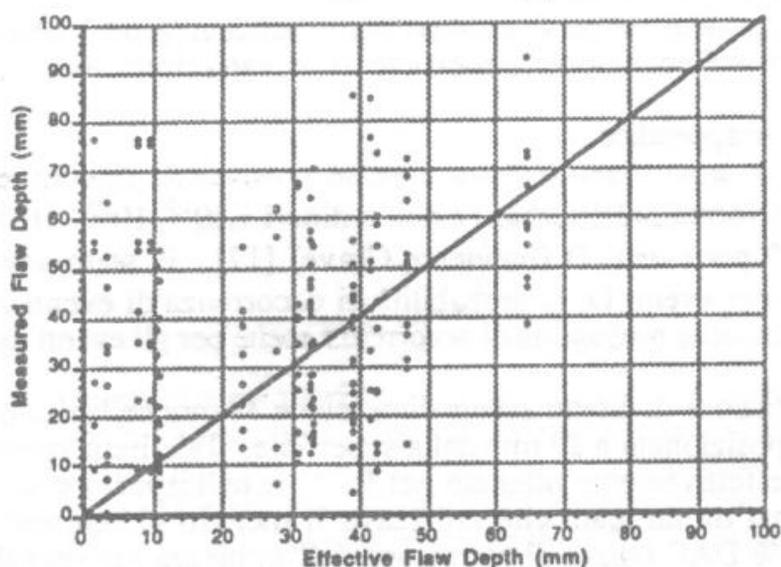


Fig. 5 Rappresentazione delle capacità di dimensionamento delle procedure ASME con sensibilità 20% DAC ricavata dall'esperienza PISC

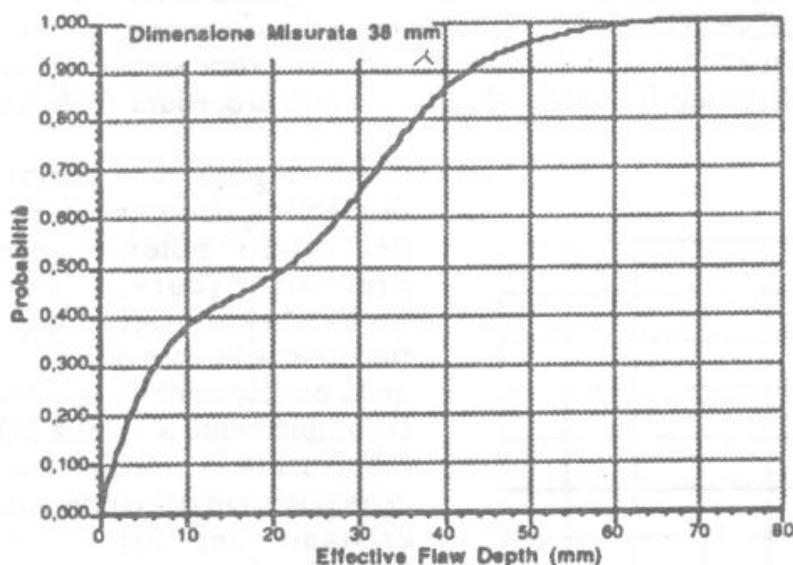


Fig. 6 Cumulata della distribuzione della dimensione effettiva dei difetti nella direzione dello spessore

A ciascun difetto presente in una struttura corrispondono diverse stime delle sue dimensioni, ciascuna con una diversa probabilità. Tale probabilità può essere ricavata a partire dai risultati PISC utilizzando distribuzioni normali. Viceversa ciascuna dimensione stimata può corrispondere a diverse dimensioni effettive. E' possibile, utilizzando le curve di probabilità sopra valutate, determinare le probabilità di corrispondenza tra l'indicazione ottenuta dai controlli non distruttivi e le dimensioni effettive (Figura 6). Il procedimento può essere ripetuto per tutte le dimensioni caratterizzanti il difetto.

Il rischio che l'indicazione fornita dai controlli sia una falsa indicazione e non corrisponda ad alcun difetto effettivamente presente nel componente ispezionato può essere tradotto in una diminuzione delle diverse probabilità di corrispondenza tra le dimensioni rilevate e le diverse dimensioni effettive. Dai dati PISC, nel caso considerato, il rischio di false indicazioni è stimabile in 5%.

Per il calcolo della probabilità di cedimento della struttura per effetto dei carichi statici, vengono valutati il contributo al cedimento dato dalla possibile presenza di difetti sfuggiti all'ispezione e il contributo dato dai difetti potenzialmente corrispondenti

all'indicazione ottenuta dal controllo diminuito della possibilità che l'indicazione sia una falsa indicazione.

Con riferimento al caso esaminato, il contributo relativo alla possibilità di esistenza di difetti sfuggiti al controllo risulta essere di $5 \cdot 10^{-7}$, abbastanza ridotto ma non del tutto trascurabile. Il contributo alla probabilità di cedimento dovuto ai difetti potenzialmente corrispondenti all'indicazione ottenuta attraverso il controllo è di $1.268 \cdot 10^{-4}$. Considerando il rischio di false indicazioni, il contributo precedente si riduce a $1.205 \cdot 10^{-4}$. Globalmente quindi, stante il risultato dell'ispezione, la probabilità di cedimento della struttura risulta essere $1.210 \cdot 10^{-4}$ pari alla somma dei due contributi precedenti.

Il valore ottenuto risulta inferiore alla metà del valore della probabilità di collasso ottenibile considerando solo le indicazioni ottenute dal controllo senza apportare alcuna correzione.

Nel caso considerato l'esperienza PISC sintetizzata in Figura 5 suggerisce che esistono maggiori probabilità che il difetto presente venga sovrastimato piuttosto che sottostimato. L'approccio affidabilistico, tenendo in modo completo dell'efficacia dei controlli, consente di quantificare l'entità delle conseguenze di una tale tendenza a sovrastimare.

Accettando per la struttura considerata un rischio di cedimento pari a 10^{-4} o inferiori (come viene generalmente richiesto per componenti di impianti ad alto rischio), il processo decisionale porterebbe a dovere interrompere l'esercizio. Utilizzando come limite per la probabilità di collasso 10^{-3} (che rappresenta comunque un rischio accettabile per le strutture convenzionali), si deve procedere alla valutazione della propagazione dei difetti potenzialmente presenti per effetto dei carichi di fatica e alla stima della vita residua.

L'analisi completa prevede di considerare l'evoluzione di tutti i difetti appartenenti alla distribuzione determinata sulla base delle indicazioni fornite dall'ispezione e delle correzioni apportate utilizzando l'esperienza PISC.

Al fine di caratterizzare la vita utile della saldatura, è stata valutata la probabilità di cedimento statico all'aumentare del numero di cicli ipotizzando la presenza del difetto individuato con il controllo (Figura 7). Per tale difetto (che ha dimensioni prossime alle massime dimensioni ammissibili previste da ASME per le saldature in acciaio ferritico dei vessel) si ha il raggiungimento del valore limite scelto per la probabilità di cedimento ($P_f = 10^{-3}$) dopo 35000 cicli.

Una valutazione con un approccio deterministico in presenza del difetto individuato dal controllo porta ad una sottostima di circa 10000 cicli della vita utile della saldatura.

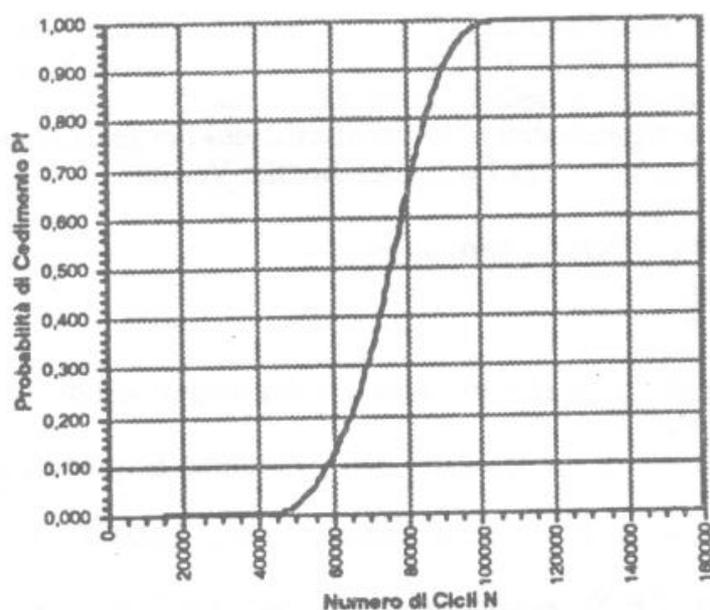


Fig. 7 Probabilità di Cedimento al procedere dell'esercizio

Considerando la presenza di un difetto rappresentativo dei difetti potenzialmente sfuggiti all'ispezione (mediana della distribuzione dei difetti potenzialmente non individuati) si ottiene una stima della vita residua circa 10 volte superiore al caso in cui sia presente il difetto limite ASME. L'esperienza PISC consente quindi di potere affermare che nel caso considerato i difetti sfuggiti all'ispezione contribuiscono al decadimento dell'affidabilità in misura molto minore (di un ordine di grandezza) rispetto al difetto individuato al limite dell'accettabilità secondo ASME.

4. Conclusioni

E' stato presentato un modello stocastico per l'analisi di elementi difettati sottoposti a carichi affaticanti.

Il modello consente di tenere conto:

- dell'influenza dell'efficacia delle ispezioni (precisione nel determinare dimensioni e posizione dei difetti e della probabilità di rilevamento di diverse tipologie di difetti);
- della severità delle condizioni operative, della possibilità del modificarsi delle condizioni di esercizio, della sequenza degli spettri di carico e del degrado delle caratteristiche del materiale durante la vita del componente;
- delle specifiche di collasso o sostituzione.

Le valutazioni della probabilità di collasso statico e dell'affidabilità strutturale al procedere dell'esercizio possono essere impiegate per ottimizzare le ispezioni e gli interventi di manutenzione e di riparazione oltre che per definire il momento in cui sostituire il componente.

Il modello può quindi essere applicato nell'ottica di un'ottimizzazione della qualità e dell'affidabilità dei componenti strutturali.

L'elemento critico per l'applicazione del modello e, più in generale, per le valutazioni di affidabilità di componenti per i quali debba ammettersi la presenza di difetti, risulta essere la determinazione dello stato di difettosità del materiale. Risulta opportuno utilizzare le informazioni e l'esperienza sull'efficacia dei controlli non distruttivi per migliorare l'attendibilità della conoscenza dello stato di difettosità dei componenti.

In particolare nel presente lavoro è stato presentato un esempio di come l'esperienza resa disponibile attraverso i RRT quali il PISC possa essere impiegata per arricchire e correggere i risultati forniti dalle ispezioni, in modo da consentire una migliore conoscenza della difettosità dei componenti ispezionati.

Ringraziamenti

L'attività ha trovato stimolo nella proficua collaborazione con il Centro Comune di Ricerca di Petten (Olanda) nell'ambito del programma PISC III e con il Working Group "Codes and Standards" - Action Group 1 - della Commissione della Comunità Europea.

Gli Autori desiderano ringraziare per i suggerimenti e le utili discussioni Serge Crutzen (JRC Petten), Eugenio Capurro (ANSALDO S.p.A.) e Olav Forli (Det Norske Veritas).

Riferimenti Bibliografici

1. Crutzen S., *PISC I and PISC II, looking for effective and reliable inspection procedures*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 86 (1985).
2. Crutzen S. et alii, *The major results of the PISC II RRT*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 115 (1989).
3. Crutzen S., Nichols R.W., Miller A.G., *PISC III: a Status Report*, SMiRT 12 Trans., Stuttgart, 1993.
4. Crutzen S., Nichols R.W., *Impact of PISC results on Codes, Standards and Regulatory Activities*, PISC Report No. 28, CEC EUR 15104 EN, Luxembourg, 1993.
5. Bogdanoff, J.L., Kozin, F. *Probabilistic Models of Cumulative Damage*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
6. Bogdanoff J.L., *A New Cumulative Damage Model - Part 1-2-3-4*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 45 June 1978 pp. 246-250, Vol. 45 June 1978 pp. 251-257, Vol. 45 Dec 1978 pp. 733-739, Vol. 47 March 1980 pp. 40-44
7. Kozin F., Bogdanoff J.L., *A Critical Analysis of some Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 14, 1981, pp. 59-89
8. Milne I. et alii, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*. R/H/R6 Rev. 3, CEGB 1986. Anche in Int. J. Pres. Ves. & Piping 32 (1988) 1-4.
9. BSI, *Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures*, BSI PD 6493: 1991.

10. ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code*, Sections III and XI, American Society of Mechanical Engineer, 1992.
11. Marshall W., *An Assessment of the Integrity of PWR Pressure Vessels*, UKAEA, 1982
12. Noel R.L., *A PWR Pressure Vessel Safety Assessment*, CSNI Rep. No. 178, Dec. 1991
13. PISC II rep. 5, *Evaluation of the PISC II trial results*, CSNI Rep. n. 121, Sept 1986; App. 5 to PISC II rep. 5, *Detailed Ultrasonic Inspection Results of all teams for Plate No. 2*, CSNI Rep. n. 121, Sept 1986.

Appendice - Caratteristiche del Materiale e Stati di Tensione

Caratteristiche Meccaniche Materiale (ASTM A 533 gr. B - T=20°C)

σ_Y		σ_U		K_{mat}	
LB95%	COV	LB95%	COV	LB95%	COV
450	0.07	620	0.07	240	0.10

Stato di Tensione (ASME Sect. III NB-3000 - T=20°C)

	P_m		P_b		Q_m		Q_b	
	UB95%	COV	UB95%	COV	UB95%	COV	UB95%	COV
A+B	230	0.05	115	0.05	450	0.10	0	0
C	450	0.05	225	0.05	450	0.10	0	0
D	450	0.05	225	0.05	450	0.10	0	0

Ciclo Involuppo per le sollecitazioni di fatica (rapporto Marshall)

	P_m		P_b		Q_m		Q_b	
	UB95%	COV	UB95%	COV	UB95%	COV	UB95%	COV
MAX	188	0.05	16	0.05	450	0.10	0	0
MIN	0	0.05	-53	0.05	450	0.10	0	0

Costanti C e m della Legge di Paris (BSI PD 6493:1991)

C	$9.49 \cdot 10^{-9}$	con	ΔK	in	MPa \sqrt{m}
m	3		da /dN	in	mm / ciclo

Nota

Le tensioni (σ_Y , σ_U , P_m , P_b , Q_m , Q_b) sono espresse in MPa; la tenacità a frattura K_{mat} è in MPa \sqrt{m} . Le notazioni sono conformi a BSI PD 6493: 1991 e ASME.

Per le caratteristiche del materiale sono riportati il valore minimo attribuendogli livello di confidenza 95% (LB95%) e il relativo coefficiente di variazione (COV); per lo stato di tensione sono riportati il valore massimo attribuendogli livello di confidenza 95% (UB95%) e il relativo coefficiente di variazione (COV).